

芯片冷却用分形微管道散热器内的压降与传热

陈运生¹, 董 涛¹, 杨朝初², 毕勤成², 翟立奎¹, 朱 丽¹, 侯丽雅¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094; 2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 陕西西安 710049)

摘 要: 受到哺乳动物消化系统和血液循环系统中物质运输与分配网络所具有的分形特征启发, 文中设计、加工出了一种电子芯片冷却用的硅制分形微管道网络散热器。在给出分形微管道网络构造过程的基础上, 探讨了分形微管道网络内部微流体的换热与压力降特性。针对利用多路感应耦合等离子蚀刻工艺制造出的硅制分形微管道网络散热器, 理论计算所得结论与流动与传热实验数据均证明: 当热传递面积、温差、努谢尔特数均相同的情况下, 分形微管道网络散热器比传统的平行微管道阵列散热器具有更高的热传递效率; 而在具有相同流速、热传递率的要求下, 分形微管道网络散热器所需的泵送功率远低于平行微管道阵列散热器所需的泵送功率; 分形维数越高, 分形微管道网络散热器的热传递效率将越高, 且所需的泵送功率将越低。

关键词: 微管道; 网络; 分形; 传热; 散热器

中图分类号: TH297 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 11-1717-04

Pressure Drop and Heat Transfer in Fractal Microchannel Heat Sinks for Cooling of Electronic Chips

CHEN Yun-sheng¹, DONG Tao¹, YANG Chao-chu², BI Qin-cheng², ZHAI Li-kui¹, ZHU Li¹, HOU Li-ya¹

(1. Mechanical Engineering School, NanJing University of Science and Technology, NanJing, Jiangsu 210094, China;

2. National Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shanxi 710049, China)

Abstract: Inspired by the fractal pattern of mammalian digestive and circulatory system, a magical design of fractal branching channel heat sinks for cooling of electronic chips is studied. Based on the fractal branching net constructing, the heat transfer and pressure drop characteristics of fluid flow in fractal microchannel net are investigated. Furthermore, the fractal tree-like microchannel heat sinks are fabricated by multiplex inductively coupled plasma etching equipment in silicon wafer. The theoretical calculation and heat transfer experiments show that the fractal channel net has a higher heat transfer rate compared with the parallel channels having the same heat transfer condition and Nusselt number, the required pumping power for fractal channel net is decreased compared with parallel channels having the same velocity and heat transfer rate. Specially, the fractal channel net with larger dimensions can achieve higher heat transfer rate and lower pumping power on the same analyzed conditions.

Key words: microchannel; net; fractal; heat transfer; heat sinks

1 引言

自 Tuckerman 和 Pease^[1] 具开创性的著作发表以来, 研究人员对芯片内部冷却用的微管道 (指直径小于 0.1 毫米的管道) 中流体的特性给予了极大的关注。Cuta 等^[2] 设计了一个由 54 根相互平行且截面为矩形 (0.70mm × 0.27mm) 的微管道阵列组成的热交换器, 其研究结论表明: 碳氟化合物制冷剂-FX3250 流过这些平行微管道时, 实测所得的单相流摩擦因子小于经典理论计算值。此外, Harms 等人^[3] 研究了去离子水在矩形截面微管道中的流动特性, 并得出结论: 局部努谢尔特的经典计算关系式对微管道同样有效。Flockhart 等人^[4] 测得

了在梯形微管道中的层流摩擦因子, 发现该因子与经典理论计算值吻合。Li 等人^[5~7] 研究了去离子水在微管道中流动时所受到的摩擦阻力, 发现对光滑的玻璃——硅制微管道中完全显影的微流路而言, 摩擦因子与雷诺数的乘积 $f \cdot Re$ 等于常规层流值 64; 然而对粗糙的不锈钢微管道中的微流体, $f \cdot Re$ 的值要比 64 高出 15 ~ 37%。从已发表的文章来看: 微管道中有关流体的实验数据与基于经典理论计算得出的数据间存在的偏差主要取决于: (1) 工作介质的性态; (2) 微管道内表面的粗糙程度。

作者发现, 目前关于微管道中流体传热和压力降的研究, 国内、外学者大都以单根微管道为研究对象, 很少涉及实际应

用中所需的网状微管道结构. 然而随着电子芯片越来越小型化, 常规冷却系统所能达到的冷却能力受到极大的挑战. 为此, 设计一种具有更高传热效率、更低压力降的微冷却系统来驱散微表面产生的热量是非常重要的.

众所周知, 哺乳动物血液循环系统和消化系统中的物质运输与分配网络是具有分形结构特征的, 例如动脉、静脉、支气管网络等; 而且当细胞与毛细血管间的距离小于 10^{-5} m 时, 细胞间的物质传输效率已被证实是极其高效的^[6]. 由于热传递和物质运输在机能上是类似的, 所以作者认为在设计新型的电子芯片冷却系统时, 可参考细胞间的物质运输与分配网络所具有的分形结构特征. 文中设计、加工出了一种新型的电子芯片冷却用分形微管道网络散热器, 并探讨了其内部微流体的换热与压力降特性.

2 分形微管道网络的生成

如图 1 所示, 在构造具有分形特征的管道网络时, 每条管道的下一层均被分成两个分叉, 即分叉数 $N=2$.

第 $k+1$ 层管道和第 k 层管道的长度之比为: $= L_{k+1}/L_k$ 即: $L_k = L_0 \cdot z^k$, 其中 L_0 代表第 0 层管道的长度, 而分形维数 $D = -1 \ln N / \ln z$, 因此 $z = N^{1/D}$ ^[8].

若设管道在分叉前与分叉后的水力直径分别为 d_k, d_{k+1} , 则 $d_k = N d_{k+1}$. 表示分叉数结构的指数值^[7], 若设管道分叉前、后的水力直径之比为 z , 则: $z = d_{k+1}/d_k = N^{-1/D}$.

根据 Mandelbort^[6]的实验结论, 哺乳动物肺部支气管分叉树结构的指数 约为 3, 分叉角 ϕ 约为 $\frac{13}{36}$. 考虑道呼吸系统中流动和物质传输的高效性, 作者在设计芯片冷却用的分形微管道网络时, 同样也将指数 选为 3, 分叉角 ϕ 应取为 $\frac{13}{36}$, 则 $d_k = d_0 z^k$.

微管道截面形状为矩形, 设各层管道的高相同, 即 $H_k = H_0$; 令前后两层微管道的宽度比为 $= W_{k+1}/W_k$, 有 $W_k = W_0 \cdot z^k$. 根据水力直径的定义, 可得 (推导过程略):

$$z = \frac{d_{k+1}}{d_k} = \frac{H_0 + W_0}{H_0 + W_0 \cdot z^{k+1}} \quad (1)$$

在构造分形微管道网络时, 可依据上述关系, 从 1 根初始管道开始, 调用 Growth. and. Branching() 函数直至获得分形微管道网络的末端 (最高层) 管道. 图 2 所示为 3 个初始管道相同、且均为 4 层的分形管道网络, 其分形维数 D 分别为 1.2、1.4、1.6; 图 2 中显示了随着 D 的增长分形网络中的管道密度也在增加. 图 3 给出了当分形管道网络的 $D=2$ 时, 不同层处

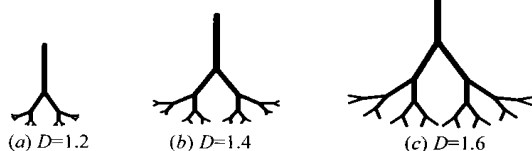


图 2 具有相同初始管道的 4 层分形网络

($k=2, 4, 6$) 的管道分布; 图 3 表明: 在 $D=2$ 时, 分形网络随着分层次数的增多, 管道分布越来越密.

作者认为: 为了保证冷却用微流体的自由循环和始终如一的热传递能力, 将具有相同结构的两个树状分形网络按镜像布置在同一块硅晶片上, 即可构造出用于电子芯片冷却用的分形微管道网络换热器, 其结构如图 4.

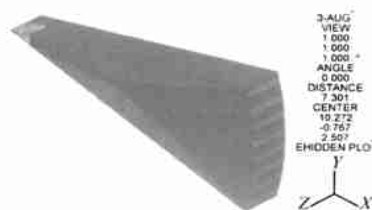
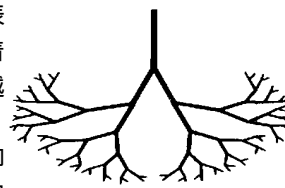


图 4 带有冷却用分形微管道网络的楔形晶片

3 分形微管道网络中的传热和压力降

3.1 分形管道网络与平行管道网络换热量的对比

对于截面形状为矩形、底面加热、顶面绝热的硅晶片上的分形微管道网络 (如图 4 所示) 而言, 其总的传热面积 S 由式 (2) 确定:

$$S = 2 \sum_{k=0}^m S_k = 2 \sum_{k=0}^m (W_k + 2 H_k) L_k N^k \quad (2)$$

其中, W_k, H_k 分别为第 k 层管道的宽度和高度, 系数 2 表明该分形网络结构由对称的两树状结构相对连接而成; m 为分形微管道网络的最高层数.

依据 Pence^[7]的假定: (1) 微管道中的流体的速度和温度分布均已达到充分发展, 且其流态属层流; (2) 当微管道中的流体通过各层的管道分叉时, 其努谢尔特数保持不变. 由此, 分形微管道网络中高一层 (第 $k+1$ 层) 微管道的传热系数 h_{k+1} 应按 (3) 式描述的关系增长:

$$\frac{h_{k+1}}{h_k} = \frac{d_k}{d_{k+1}} \quad (3)$$

结合 (1) 式得:

$$\frac{h_{k+1}}{h_k} = \frac{1}{z} = \frac{1}{H_0 + W_0} \cdot \frac{H_0 + W_0}{H_0 + W_0 \cdot z^{k+1}} \quad (4)$$

考虑到矩形截面微管道设计的趋势和硅加工工艺的不断进步的实际, 高宽比 k 往往大于 1, 甚至达到 6 以上, 而 z 则介于 0.5 - 1 之间; 因此在较大高宽比 ($k > 3$), 近似地有 $\frac{H_0 + W_0}{H_0 + W_0 \cdot z^{k+1}} \approx 1$, 因而式 (4) 可近似为:

$$h_k = h_0 \cdot z^{-k} \quad (5)$$

由圆管内充分热发展区的特性^[5]可知: 在一条等截面的管道中, 受恒定热流加热的充分发展流动时管壁与整体流间温差 T 保持恒定. 为了对比分形管道网络和平行管道网络间的传热量, 此处设定, 分形微管道网络内各分叉层间的温差

亦为 T , 因此分形微管道网络总的对流传热量为:

$$q_{fl} = 2 \sum_{k=0}^m h_k S_k T = 2 \sum_{k=0}^m h_k (W_k + 2H_k) L_k N^k T$$

也即,

$$q_{fl} = 2 \sum_{k=0}^m h_0 \left[W_0 - k(W_0^k + 2H_0) L_0 \right] N^k T$$

$$= 2 h_0 L_0 \left[W_0 \frac{1 - (N)^{m+1}}{1 - N} + 2 H_0 \frac{1 - (N/)^{m+1}}{1 - (N/)} \right] T \quad (6)$$

对于管道直径为 d_0 且与分形管道网络具有相同的传热面积 S 、温差 T 和相同努谢尔数 Nu 的平行微管道网络, 其总的对流传热量为:

$$q_{pl} = 2 h_0 L_0 \left[W_0 \frac{1 - (N)^{m+1}}{1 - N} + H_0 \frac{1 - (N)^{m+1}}{1 - N} \right] T \quad (7)$$

图 5 所示为 $m=4$ 时的 $q_{fl}/q_{pl} \sim D$ 图, 图 5 中的曲线表明: (1) S 、 T 、 Nu 均相同的情况下, 分形微管道网络比传统的平行管道网络具有更强的传热能力; (2) D 越高, 分形微管道网络的传热能力越强^[8].

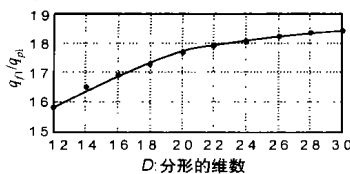


图 5 $q_{fl}/q_{pl} \sim D$ 图 ($m=4$)

3.2 分形管道网络与平行管道网络所需的泵送功率

在讨论分形微管道网络中的压降时, 若忽略分叉效应, 则流体在微管道中的压降可描述为:

$$p = 2 \sum_{k=0}^m \frac{c}{d_k^2} L_k u_k \quad (8)$$

其中, u_k 是微流体在第 k 层管道中的流动速度, c 为常量。由质量守恒定律有 $u_k d_k^2 N_k = u_0 d_0^2$, 则

$$u_k = u_0 \left(\frac{d_0}{d_k} \right)^2 \frac{1}{N^k} \quad (9)$$

$$\text{则: } p = 2 \sum_{k=0}^m \frac{c}{d_k^4} L_k d_0^2 u_0 \frac{1}{N^k} \quad (10)$$

$$\text{此时体积流量 } Q \text{ 为: } Q = u_0 \frac{1}{4} d_0^2 \quad (11)$$

分形微管道网络所需的泵送功率可描述为

$$P_{fl} = Q p = \frac{1}{2} u_0 d_0^2 \sum_{k=0}^m \frac{c}{(d_0 z^k)^4} L_k d_0^2 N^k u_0$$

$$= \frac{c}{2} u_0^2 L_0 \frac{1 - (N z^4)^{m+1}}{1 - (N z^4)} \quad (12)$$

为对比分形管道网络与传统平行管道网络所需的泵送功率, 现构建一个与分形管道网络具有相同初始流速 u_0 、温差 T 和相同传热量的平行管道网络。即:

$$S_{pl} = L(W + 2H)n, q_{pl} = h S_{pl} T = q_{fl} \quad (13)$$

其中: S_{pl} 为平行管道网络的总传热面积; W 、 H 为各平行管道的宽和高; $L = 2L_0$; n 为平行管道的根数, 此处设为整数。则有:

$$h(W + 2H)Ln = 2 h_0 L_0 \left[W_0 \frac{1 - (N)^{m+1}}{1 - N} + H_0 \frac{1 - (N)^{m+1}}{1 - N} \right] \quad (14)$$

依据 Mandelbrot^[6] 的推导: 分形微管道网络中的流体与平行微管道网络中的流体应具有相同的努谢尔数, 也即 $hd = h_0 d_0$ 。由式 (14), 得:

$$n = \frac{W_0}{W + 2H} \left[W_0 \frac{1 - (N)^{m+1}}{1 - N} + H_0 \frac{1 - (N)^{m+1}}{1 - N} \right] \quad (15)$$

平行管道网络中的压力降为:

$$p_{pl} = 2 \frac{c}{d^2} L_0 u_0, \text{ 体积流量为: } Q_{pl} = \frac{1}{4} n u_0 d^2, \text{ 则常规平行微管道网络所需的泵送功率为:}$$

$$P_{pl} = p_{pl} \cdot Q_{pl}$$

$$= \frac{c u_0^2 L_0 W_0}{2(W + 2H)} \left[W_0 \frac{1 - (N)^{m+1}}{1 - N} + H_0 \frac{1 - (N)^{m+1}}{1 - N} \right] \quad (16)$$

当 $m=4$ 时, 图 4 中所给微管道换热器的 $P_{fl}/P_{pl} \sim D$ 图, 如图 6 所示, 图中曲线表明: (1) 对于初始流速、温差、传热量、努谢尔数均相同的分形微管道网络和平行管道网络而言, 前者所需的泵送功率远低于后者; 且 D 越高, 分形微管道网络的这种优越性越突出^[8].

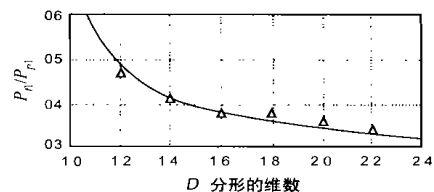


图 6 $P_{fl}/P_{pl} \sim D$ 图 ($m=4$)

4 实验与结论

依据图 4, 作者设计出一种电子芯片内部冷却用分形微管道 (矩形截面) 网络散热器, 如图 7(a) 所示, CAD 模型的包围尺寸为 $12\text{mm} \times 12\text{mm} \times 5.4\text{mm}$; 分形维数 D 取为 1.5。

按照上述指标, 作者所设计的树状分形微管道网络散热器原型件如图 7(b) 所示。结合快速成型技术, 按 $750\mu\text{m}$ 等厚切片, 图 7(b) 所示的原型件共分为 112 层, 使用掺有 1000 目 Al_2O_3 粉末且经研磨的聚碳酸酯 (polycarbonate) 粉料为成型材料, 并将截面曝光能量调整至 $80 \sim 120\text{mJ}/\text{mm}^2$, SLS (Selective Laser Sintering) 工艺加工该零件应耗时 3.2 小时。更进一步, 利用多路感应耦合等离子体蚀刻技术可在 3 英寸硅衬底上加工出硅制分形微管道网络散热器实物, 其扫描电子显微照片 (scanning electron microscope, SEM) 如图 8 所示。

至此, 上文研究了一类可用于芯片内部冷却用的、不同维数的分形微管道网络散热器, 并将其传热量、所需泵送功率与传统的平行微管道网络的相应指标进行了比较。理论推算和

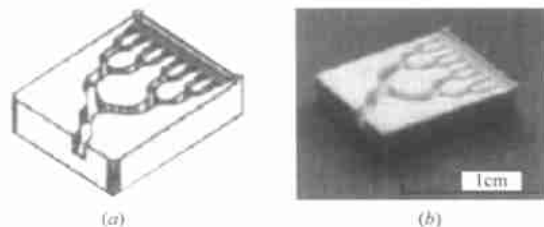


图 7 分形微管道网络散热器原型件

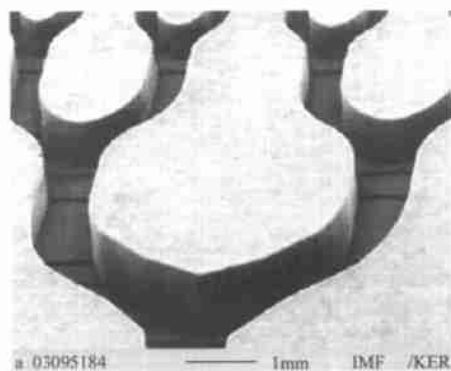


图8 电子芯片冷却用分形微管道网络散热器的局部 SEM 照片
实验研究表明:

(1) 在传热面积、温差、努谢尔特数均相同的情况下,分形微管道网络散热器比传统的平行微管道阵列型散热器具有更强的传热能力;

(2) 同等条件下,分形网络散热器所需的泵送功率远低于平行微管道阵列散热器;

(3) 分形维数越高,分形微管道网络散热器的传热能力越强,且分形微管道网络散热器所需的泵送功率越低;但维数越高相应的网络表面积也越大,对实际应用而言,分形维数的选择需以实际的几何形状为基础。

总之,树状分形微管道网络散热器的应用可提高微热交换器的效率。相信这种新型的分形微管道网络散热器将来在微机电系统、生物工程学、生物工艺学、航空领域和选择性膜中都将得到广泛的应用。

参考文献:

- [1] Tuckerman D B, Pease R F W. High-performance heat sinking for VLSI [J]. IEEE Electron Device Lett. 2, 1981:126 - 129.
- [2] Cuta J M, McDonald C E, Shekarraz A. Forced convection heat transfer in parallel channel array microchannel heat transfer [J]. ASME Advance in Energy Efficiency, Heat/Mass Transfer Enhancement, 1996, ASME 338:17 - 23.
- [3] Harms T M, Kazmierczak M J, Gerner F M. Developing convective

heat transfer in deep rectangular microchannels[J]. Int. J. Heat Fluid Flow, 1999 (20): 149 - 157.

- [4] Flockhart S M, Dhariwal R S. Experimental and numerical investigation into the flow characteristics of channels etched in (100) silicon[J]. Trans. ASME J. Fluids Engng, 1998 (120): 291 - 295.
- [5] Li Z X, Du D X, Guo Z Y. Experimental study on flow characteristics of liquid in circular microtubes[A]. Proceeding of the Int. Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Micro Scale [C]. Banff, Canada, 2000. 162 - 167.
- [6] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature[M]. W. H. Freeman, New York, 1982.
- [7] Pence D V. Improved thermal efficiency and temperature uniformity using fractal-like branching channel networks[A]. Proceeding of the Int. Conference on Heat Transfer and Transport Phenomena in Micro Scale [C]. Banff, Canada, 2000. 142 - 148.
- [8] Chen Y P, Cheng P. Heat transfer and pressure drop in fractal tree-like microchannel nets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002 (45): 2643 - 2648.

作者简介:



陈运生 男, 1940 年生于上海市, 南京理工大学机械工程学院教授, 博导, 主要从事特种机械总体, 动力学分析和仿真及应用领域的研究, 享受政府特殊津贴。



董涛 男, 1978 年生于河南省南阳市, 南京理工大学机械工程学院博士, 主要从事微机械设计、制造及微流体技术的研究。Email: nustlibrary@263.net.